

University of Groningen

Probing cosmic velocity flows in the local universe

Romano Díaz, Emilio

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2004

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Romano Díaz, E. (2004). *Probing cosmic velocity flows in the local universe*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

*Deze zon, genaamd 4 Beweging, is onze Zon, waar we nu wonen.
En hier is zijn teken, zoals hij viel in het Vuur van de Zon,
in de goddelijke oven, daar in Teotihuacan.
Deze was ook de Zon van onze Prins, in Tula, van Quetzalcoatl.
De vijfde Zon, 4 Beweging is zijn teken,
wordt de Zon van beweging genoemd, omdat hij beweegt, hij volgt zijn pad.*

Azteeks gedicht over de creatie van de Vijfde Zon (fragment, Codex Chimalpopoca).

Nederlandse Samenvatting

Waarschijnlijk hebben er al voor het begin van de beschaafde wereld mensen 's nachts naar de sterren aan de hemel gestaard en zich verwonderd over de wereld waarin zij leefden. De mensheid heeft zich al eeuwen bezig gehouden met vragen als “Hoe is het heelal ontstaan?” en “Hoe is alles daarna gevormd?”. Door de eeuwen heen zijn er allerlei verklaringen gegeven, want bijna elke beschaving en samenleving heeft zijn eigen kosmogonie en verklaring voor het heelal gegeven. Deze zoektocht is krachtig doorgezet tot in de moderne tijd. Het is zelfs zo dat tegenwoordig de mensheid voor het eerst dichtbij een alomvattend wetenschappelijk verantwoord antwoord op deze eeuwenoude vragen lijkt te zijn, op basis van een grote hoeveelheid wetenschappelijke kennis waaronder een voortdurend toenemende en ontzagwekkende hoeveelheid observationeel bewijs.

In het huidige kosmologische model wordt verondersteld dat het heelal waarin wij leven 13,7 miljard jaar geleden is ontstaan, geboren uit een enorme expanderende vuurbal die we de *Hot Big Bang* noemen. Op dat moment zijn ruimte en tijd, net als alle materie en energie die het heelal omvat, ontstaan. Het vroege heelal was extreem heet en dicht, geleidelijk afkoelend en verdunnend terwijl het uitdijde. De theoretische beschrijving van deze gebeurtenis is gebaseerd op twee cruciale aannames. De eerste is dat de dynamische ontwikkeling volledig bepaald wordt door de zwaartekracht, die beschreven wordt door Einstein's algemene relativiteitstheorie. Volgens deze theorie is de zwaartekracht de manifestatie van de kromming van het systeem. Het Big Bang heelal is gebaseerd op de aanname dat de geometrie van het heelal sterk beperkt wordt door het kosmologische principe. Dit stelt dat het heelal homogeen en isotroop is. Met andere woorden, het heelal heeft overal gelijke eigenschappen, zowel wat betreft de verdeling van de materie als wat betreft de fysische wetten die er gelden, terwijl het heelal er bovendien in elke richting hetzelfde uit moet zien. Er zijn maar drie geometriën die aan deze eisen voldoen. In combinatie met de vergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie vinden we dat er drie corresponderende oplossingen zijn, de Friedmann-Robertson-Walker-Lemaitre [FRWL] modellen, die het theoretische kader vormen voor de ontwikkeling van het uitdijende heelal. De ontdekking door Hubble in 1929 van het systematisch van ons afbewegen van melkwegstelsels vormde het eerste bewijs voor de juistheid van deze kijk op de dynamische kosmos.

De directe gevolgtrekking van de ontdekking van Hubble was en is dramatisch: de kosmos moet een begin hebben! Op basis van de FRWL kosmologische modellen en onze kennis van de wetten van de natuurkunde hebben kosmologen de volledige thermische geschiedenis van het heelal kunnen reconstrueren tot op een fractie van een seconde na zijn geboorte. Dit is wat we de *Hot Big Bang* theorie noemen. De resulterende voorspellingen voor een verscheidenheid van belangrijke gebeurtenissen en fenomenen tijdens de ontwikkeling van het heelal hebben ons een waarlijk indrukwekkende hoeveelheid bewijzen opgeleverd voor de geldigheid van de *Hot Big Bang* theorie. Wellicht de meest indrukwekkende voorspelling is de kosmische achtergrondstraling, het overblijfsel van de straling die ons uit elke richting van de hemel bereikt en die afkomstig is van 379,000 jaar na de Big Bang. De ontdekking hiervan in 1965 door Penzias & Wilson wordt terecht gezien als een van de belangrijkste wetenschappelijke doorbraken van de 20^e eeuw. Met een huidige temperatuur van slechts 2.725°K is deze vrijwel perfect isotroop en vertoont temperatuursvariaties over de hemel van kleiner dan 1 op 10⁵, een meer dan indrukwekkende bevestiging van het kosmologische principe. Het vroege heelal was bijna perfect homogeen.

Terwijl de bewijzen ten gunste van het Hot Big Bang heelal zich opeen hebben gestapeld, werden



Figuur 1 — Voorbeelden van sterrenstelsels in ons heelal, een spiraalstelsel (linkerpanel; Met dank aan: G.F. Benedict, A. Howell, I. Jorgensen, D. Chapell, J. Kenney en B.J. Smith en NASA) en een elliptisch sterrenstelsel (rechterpanel, met dank aan: NOAO,AURA,NSF). In het middelste panel wordt een cluster van sterrenstelsels getoond die bestaat uit enkele tientallen sterrenstelsels (Met dank aan: NOAO,AURA,NSF).

wij geconfronteerd met het raadsel dat op relatief kleine schalen het heelal helemaal niet homogeen is, lokaal niet eens isotroop. De kosmos wemelt daarentegen van rijke en sterk wisselende structuren. Iedereen kent planeten en sterren. Zij zijn met honderden miljarden, samen met gas en stof gegroepeerd in wat beschouwd kunnen worden als de meest fundamentele bouwstenen van het waarneembare heelal, de *sterrenstelsels*. Sterrenstelsels maken op hun beurt deel uit van nog grotere en massievere structuren, *groepen* en *clusters* van sterrenstelsels (zie Figuur 1). Deze zijn ook onderdeel van een hiërarchie van steeds grotere systemen, op schalen van tientallen en zelfs honderden Megaparsecs vormen ze *superclusters*, die zelf onderdeel zijn van een patroon dat eruit ziet als een kosmisch web dat zich uitstrekt door het volledige waarneembare heelal.

Een van de belangrijkste vraagstukken uit de hedendaagse kosmologie is daarom het verklaren van de onregelmatige verdeling van de materie die zich op schalen kleiner dan honderd Megaparsec bevindt, en wel binnen de context van de Big Bang kosmologie. In dit proefschrift proberen we deze vraag te beantwoorden, en kijken we in het bijzonder naar zaken die verband houden met de samenhangende stromen van materie in het heelal, tot op een afstand van ongeveer $100 h^{-1} \text{Mpc}$. Hierbij volgen we de standaardleer van structuurvorming in het heelal, de theorie van gravitationele instabiliteit. Deze vormt een uitbreiding van de standaard Hot Big Bang theorie met een extra element. Dit stelt dat hoewel het vroege heelal vrijwel volledig glad was, dit toch niet helemaal het geval was. In plaats daarvan vertoonden de verdeling van materie en de kosmische uitdijning kleine fluctuaties. Deze werden versterkt door de zwaartekracht en groeiden uit tot de rijkdom aan structuur die we door onze telescopen zien. Ook hiervoor bestaat een ruime hoeveelheid bewijs, waarbij het weer waarnemen van de kosmische achtergrondstraling en de detectie van kleine temperatuursschommelingen door de COBE en WMAP satellieten waren die ons voorzien hebben van voldoende vertrouwen om het onderzoek uit te voeren dat in dit werk wordt gepresenteerd.

De Hot Big Bang

Tot aan het begin van de twintigste eeuw werd aangenomen dat het heelal statisch was. In 1916 stelde Albert Einstein de algemene relativiteitstheorie op, samen met de vergelijkingen die de dynamica van het heelal beschrijven. Einstein ontdekte dat volgens deze vergelijkingen het heelal uit moet dijen of moet krimpen, volledig in strijd met het bestaande beeld van een statisch heelal¹.

¹Hij geloofde deze resultaten niet en stelde daarom voor om een extra term aan zijn bewegingsvergelijkingen toe te voegen, zodat het heelal toch statisch is. Deze term wordt de *kosmologische constante* genoemd en wordt aangegeven met de Griekse letter Λ .

Friedman slaagde erin om de bewegingsvergelijkingen voor algemene homogene en isotrope modellen van het heelal op te lossen binnen de context van de algemene relativiteitstheorie. Voortbouwend op dit uiterst belangrijk maar destijds onvoldoende erkende werk, was het de Belgische priester Georges Lemaitre die niet alleen onafhankelijk dezelfde vergelijkingen in 1927 oploste, maar zich bovendien ook de natuurkundige gevolgen realiseerde. Terugrekenend in de tijd zag hij in dat een uitdijend heelal een begin gehad moet hebben in een extreem hete en dichte toestand met de naam "Oeratoom". Spoedig daarna, in 1929, ontdekte Edwin Hubble dat sterrenstelsels van ons af bewegen met een snelheid die toeneemt naarmate ze op grotere afstand van ons staan. Dit universele verband staat bekend als *de wet van Hubble*. Zonder twijfel vormt deze ontdekking een van de grootste wetenschappelijke revoluties in de menselijke geschiedenis, die het eerste duidelijke en overtuigende bewijs leverde voor het feit dat ons heelal niet statisch is, maar "uitdijt"! In de afgelopen paar jaar heeft de nauwkeurigheid van moderne satellieten geleid tot een convergentie van de geschatte uitdijings-snelheid van het heelal naar een waarde in het smalle bereik rond $H_0 \approx 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (de *Hubble constante*). Voor elke Megaparsec² verder weg lijkt de snelheid van een ver weg staand object in de richting van ons toe te nemen met 71 km s^{-1} .

Met het nieuwe bewijs voor een uitdijend heelal werd de astronomische gemeenschap geconfronteerd met een volledig nieuw stel vragen. Wat was de aard van deze uitdijning? Zal de uitdijning eeuwig voortduren? Zal het heelal geleidelijk uitdijen tot deze een dynamisch evenwicht bereikt en vanaf dat moment voor eeuwig in een statische toestand blijven? Zal het heelal een kritiek punt bereiken waarna het weer begint samen te trekken als een omgekeerde Big Bang, de *Big Crunch*? Deze vragen bleven lange tijd onbeantwoord, aangezien er geen waarnemingen waren die ze overtuigend konden beantwoorden.

Eén aspect van het uitdijende heelal blijkt voor ons van essentieel belang te zijn om de fysische omstandigheden en processen in zowel het vroege als het toekomstige heelal te onderzoeken. De FRWL modellen corresponderen alle met adiabatische uitdijing, hetgeen ons in staat stelt om de temperatuur en dichtheid van de inhoud van het heelal op ieder moment te voorspellen. Met andere woorden, terwijl het heelal uitdijt, koelen straling en materie af en, omgekeerd, als het heelal zou krimpen, dan zouden dichtheid en temperatuur toenemen. Dit heeft ons in staat gesteld om tijdens de afgelopen decennia een indrukwekkende hoeveelheid bewijzen te verzamelen voor de Hot Big Bang theorie door verschillende van de natuurkundige voorspellingen te testen.

Hoewel er een verscheidenheid aan tests is, vormen vier tot vijf ervan de meest solide pilaren van de Big Bang theorie. Wellicht de meest eenvoudige is het feit dat de Big Bang een verklaring geeft voor een verbazingwekkend eenvoudige waarneming door Olbers in de vroege 19^e eeuw: de nachtelijke hemel is donker. Alleen in een heelal met een eindige leeftijd en een eindige lichtsnelheid kan dit worden begrepen. Het is duidelijk dat Hubble's (isotrope) uitdijende heelal niet alleen een belangrijke bevestiging vormt van de werkelijkheid van de FRW beschrijving, maar dat deze ook beschouwd kan worden als het begin van de kosmologie als "natuurwetenschap". Wellicht het meest interessant zijn de twee waarnemingsresultaten die tot de vroegste tijden van onze kosmos reiken. De ongelooflijke precisie waarmee de Big Bang theorie de uitkomst en resultaten van de allervroegste fase van de primordiale nucleosynthese van de lichte chemische elementen weet te voorspellen, brengt ons terug naar de eerste drie minuten van het heelal. De voorspelling van een isotrope deken van kosmische thermische straling, met een ongelooflijk nauwkeurig spectrum van een zwart lichaam met een temperatuur van $T \approx 2.725^\circ K$, heeft ons in staat gesteld om de ontdekking hiervan in 1965 om te zetten in de uiteindelijke bevestiging van de werkelijkheid van de Big Bang. De bijnaam is omgezet in een eervolle titel!

Ongeveer drie minuten na de Big Bang, toen de temperatuur van het heelal afgekoeld was naar een paar miljard graden, was het heelal gevormd tot een enorme kernreactor. De lichte chemische elementen Deuterium, $^3\text{Helium}$ en $^4\text{Helium}$, evenals een kleine hoeveelheid Lithium, waren net gevormd voordat de uitdijing de kernreactor uitzette. De voorspelling van de Big Bang theorie voor de gevormde hoeveelheid van deze elementen komt heel goed overeen met de waarnemingen, een zeer

²Mpc = Megaparsec $\approx 3\,260\,000$ lichtjaar $\approx 30\,800\,000\,000\,000\,000\,km$

overtuigende overwinning!

In de daaropvolgende honderdduizenden jaren hebben de fotonen, in een nauwe wisselwerking met het kleine overblijfsel aan elektronen en protonen³, een evenwicht bereikt en hun energie verdeeld over een bijna perfect zwartelichaamsspectrum. Ongeveer 279,000 jaren hierna was de temperatuur van het heelal afgekoeld tot slechts 3000°K , waarna protonen en elektronen samen waterstofatomen vormen tijdens deze zogenaamde *Recombinatie*⁴. De resulterende "ontkoppeling" van straling en materie vond vrijwel gelijktijdig plaats. Niet langer door vrij rondzwevende elektronen verstrooid, konden fotonen hun lange reis door de diepten van een vrijwel doorzichtig heelal beginnen. Deze fotonen van de *kosmische achtergrondstraling*, die hun vrijwel perfecte zwartelichaamsspectrum hebben behouden, lijken hun oorsprong te vinden op het *oppervlak van laatste verstrooiing*. Dit oppervlak markeert de positie van de atomen die de waargenomen fotonen van de kosmische achtergrondstraling als laatste hebben verstrooid⁵. Daarna is de geleidelijke afkoeling van het heelal samengegaan met een corresponderende afkoeling van de temperatuur van de fotonen.

Een voortdurend toenemende vloed van nieuwe kosmologische waarnemingen, afkomstig van grotere en grotere diepten van het heelal, heeft geleid tot een convergerende consensus met betrekking tot het heelal waarin wij leven. Met een indrukwekkende nauwkeurigheid is een nogal opvallende verzameling waarden voor de cruciale kosmologische parameters te voorschijn gekomen, nu algemeen bekend onder de naam *Concordance Model*. Satellietexperimenten, zoals COBE en MAP, in samenhang met ballonexperiment Boomerang, hebben het embryonisch heelal ten tijde van de recombinitie in groot detail in kaart weten te brengen. Niet alleen hebben ze de geldigheid van de Hot Big Bang aangetoond, ze hebben ons ook overtuigd dat het heelal *vlak* is, de leeftijd nauwkeurig vastgesteld op 13,7 miljard jaar en onafhankelijk de baryoninhoud bevestigd waar ook de primordiale nucleosynthese op wees. Mede dankzij de grote roodverschuivingsstudies die vanaf de grond plaatsvinden, waarvan we hier de honderduizenden sterrenstelselposities noemen die door 2dFGRS en SDSS gemeten zijn, hebben we de (donkere) materie inhoud van het heelal kunnen bepalen. De grootste verrassing werd geleverd door de programma's om Supernova Ia explosies tot op grote diepten in het heelal waar te nemen en te meten. Deze hebben geleid tot de bijna onontkoombare conclusie dat een ongrijpbare maar alomtegenwoordige "donkere energie" moet bestaan.

Dit brengt ons tot de toestand dat hoewel het Concordance Model een goede beschrijving van de werkelijkheid lijkt te vormen er nog steeds een groot aantal onopgeloste raadsels overblijft. Het standaard FRW model kan bij lange na niet verklaren waarom het heelal vrijwel "vlak" is, een probleem dat gewoonlijk aangeduid wordt met de naam "Flatness Problem". Evenzo blijft het de vraag waarom de kosmische achtergrondstraling in elke richting dezelfde temperatuur heeft, hoewel de kosmische horizon tijdens recombinitie niet groter is dan $\approx 1^{\circ}$. Dit probleem staat bekend als het "Horizon Problem". In samenhang met andere samenlopen van omstandigheden hebben deze vragen geleid tot een uitbreiding van de *Hot Big Bang* theorie met een inflatie fase-overgang waarin het zeer vroege heelal exponentieel is uitgedijt met een factor van 60 ordes van grootte. Evenzo, zoals we zullen zien in de volgende paragraaf, zou inflatie kunnen helpen om de oorsprong van structuur te verklaren.

Kosmische Inventaris: Materie en Donkere Materie

Als we naar het heelal kijken is het licht dat door sterren wordt uitgestraald het eerste dat we zien. Hoewel sterren wellicht de meest opvallende en zichtbare bewoners van ons heelal zijn, blijken ze slechts een heel klein gedeelte van de totale hoeveel materie in de kosmos te representeren. Volgens de laatste schattingen zijn bevatten sterren niet meer dan 0,25% van de totale hoeveelheid energie, 0,9% van de totale hoeveelheid materie en zelfs maar 5% van het totale aantal baryonen in het heelal. Planeten,

³Het is goed om te beseffen dat ons heelal een heel uitzonderlijk fysisch systeem is in de zin dat er twee miljard fotonen zijn voor iedere baryon!

⁴Deze gebeurtenis heeft deze naam om historische redenen gekregen. Het is duidelijk geen toepasselijke naam, wat het was de eerste keer dat elektronen en protonen samen waterstofatomen vormden.

⁵Sommige van deze fotonen zijn verantwoordelijk voor $\sim 1\%$ van de ruis van onze TV-toestellen.

manen, asteroïden en stof die om deze sterren draaien, corresponderen met een nog bescheidenere fractie. In het verleden is er wel gespeculeerd dat een grote hoeveelheid extreem zwakke sterren, bruine dwergen of objecten die net niet tot sterren zijn gevormd, gezamenlijk een veel grotere hoeveelheid massa bevatten, maar er is geen overtuigend bewijs voor deze stelling gevonden. Ook is er geen bewijs gevonden voor een grote hoeveelheid materie in een kerkhof van overleden sterren, zwarte gaten of uitgedoofde witte dwergen. Naast de honderden miljarden sterren die zich in sterrenstelsels bevinden, bevatten deze echter ook grote hoeveelheden gas. Radiotelescopie hebben het diffuse neutrale waterstof en de dichtere en massievere moleculaire gaswolken in kaart gebracht. Infrarood- en submillimetertelelescopen hebben in de kern van deze wolken gekeken, de plek waar sterren geboren worden. Alles bij elkaar vinden we op deze manier niet meer dan nog eens 30% van de massa in sterren. Een veel grotere hoeveelheid baryonen is ontdekt binnen rijke clusters van sterrenstelsels. Deze bevatten grote hoeveelheden extreem heet geïoniseerd intra-cluster gas. Bij temperaturen van ongeveer honderd miljoen graden K zendt dit gas röntgenstraling uit. Dit gas bevat ten minste drie keer zoveel materie als de sterrenstelsels zelf die in dezelfde cluster bewegen. In totaal zou dit gas maximaal 0,7% van de hoeveelheid materie in het heelal kunnen bevatten.

Gas en sterren zijn gemaakt van hetzelfde materiaal als wijzelf, baryonische materie die voornamelijk uit protonen en neutronen bestaat. Eén van de grote successen van de Hot Big Bang theorie is de voorspelling geweest dat de totale hoeveelheid baryonen in het heelal een magere 4,4% bedraagt van de totale hoeveelheid massa die nodig is voor een vlakke geometrie van het heelal. Als we alle boven beschreven bijdragen bij elkaar optellen dan vinden we dat de meeste baryonische materie nog niet ontdekt is. Een bijzonder opwindende gedachte daarbij is dat wellicht 80% van de baryonen door de uitgestrekte structuren van het kosmische web zweeft, en wel in de vorm van een warm of een koud plasma.

Een ontvullende gedachte is dat de materie die uit baryonen bestaat slechts een klein onderdeel vormt van de totale kosmische inventaris. Door de bewegingen van sterren en gas in melkwegstelsels te bestuderen, evenals de bewegingen van melkwegstelsels in de kosmos, hebben we ontdekt dat deze bewegingen veroorzaakt moeten worden door de gravitationele actie van veel grotere hoeveelheden materie. Waarnemingen laten zien dat terwijl baryonen niet meer dan 4,4% van de kritieke massa van het heelal kunnen bevatten, de totale hoeveelheid materie 27% van deze kritieke massa moet bedragen.

De eerste twee aanwijzingen voor het bestaan van een gravitationeel dominante donkere materie-component werden beschreven door Oort en Zwicky in de jaren 30 van de 19e eeuw. Oort ontdekte dat de sterren in onze Melkweg sneller loodrecht ten opzicht van het vlak van de Melkweg bewegen dan alle sterren in het Galactische vlak samen kunnen verklaren. De baanbewegingen van sterren en gaswolken in de buitendelen van sterrenstelsels duiden op zelfs nog grotere hoeveelheden donkere materie, in een donkere materie halo om sterrenstelsels heen. Het werk van astronomen uit Groningen (Van Albada & Sancisi) heeft hierbij sleutelrol gespeeld. Op grotere massaschalen werden zelfs nog sterkere discrepanties tussen de gravitationele en zichtbare materie aangetroffen. Fritz Zwicky ontdekte in 1930 dat de snelheden van de sterrenstelsels in de Coma clusters zo hoog waren dat de cluster niet bijeen zou kunnen worden gehouden door de onderlinge zwaartekracht van de sterrenstelsels. Als er niet meer dan 100 keer zoveel materie aanwezig was dan zichtbaar in sterren dan zou de cluster uiteen vliegen. In de jaren hierna is een vergelijkbare hoeveelheid materie aangetroffen in elk waargenomen cluster van sterrenstelsels. De aanwezigheid van deze materie kon niet alleen afgeleid worden uit de bewegingen van de sterrenstelsels binnen de clusterpotentiaal, maar ook uit de thermische toestand van het hete intra-cluster gas dat in het röntgen straling uitzendt, als ook uit het effect dat de cluster heeft op de lichtpaden van lichtdeeltjes, afkomstig van achtergrondstelsels, die de cluster passeren (afbuiging door gravitatielenzen). Deze trend zet zich voort op de nog grotere Megaparsec schalen: de kosmische stromen van sterrenstelsels evenals de recent gemeten zwakke afbuigingen van het licht dat door de inhomogene Megaparsec materieverdeling beweegt, duiden op een vergelijkbare of wellicht iets grotere hoeveelheid donkere materie.

Aangezien de totale hoeveelheid kosmische materie ongeveer zeven keer groter is dan de maximale hoeveelheid baryonische materie, moet de gedetecteerde donkere materie “niet-baryonische materie” zijn. Tot op heden hebben we geen directe en duidelijke aanwijzingen voor de aard van deze materie

gevonden. In de loop van de tijd is een groot aantal soorten potentiële kandidaten de revue gepasseerd. Gedurende een korte tijd vormden de *massieve neutrino's* een serieuze kandidaat, om snel daarna vervangen te worden door een klasse van koude en niet botsende *exotische* deeltjes met een lange levensduur, de zogenaamde *Koude Donkere Materie*. De identiteit van deze donkere materiedeeltjes is nog steeds onbekend, hoewel er allerlei speculaties gaande zijn. De brede, speculatieve klasse van zwak wisselwerkende en massieve deeltjes, WIMPs genaamd, of een heel licht deeltje dat *axion* wordt genoemd behoren tot op heden beiden tot de favorieten.

Op dit moment lijkt *Materie* 27% van de hoeveelheid energie in het heelal voor zijn rekening te nemen, waarvan het merendeel in de vorm van *Donkere Materie*. Sinds enkele jaren weten we dat *Donkere Energie* een nog groter gedeelte, 73%, in beslag neemt, hoewel de aard hiervan vrijwel volsterkt onbekend is. Wat we echter wel weten is dat deze gelijkmatig over het heelal verdeeld is en niet samenklontert, waardoor de donkere energie een onbelangrijke rol speelt bij de vorming van structuur. Het is dus zo dat terwijl zowel de donkere energie als de donkere materie de uitdijning en daarmee het lot van het heelal bepalen, alleen de donkere materie kan samenklonteren en structuren vormen. Daarom is de *Donkere Materie* de bepalende factor voor de uitkomst van de structuurvormingsprocessen in het heelal, die de kern vormen van het werk dat beschreven wordt in dit proefschrift.

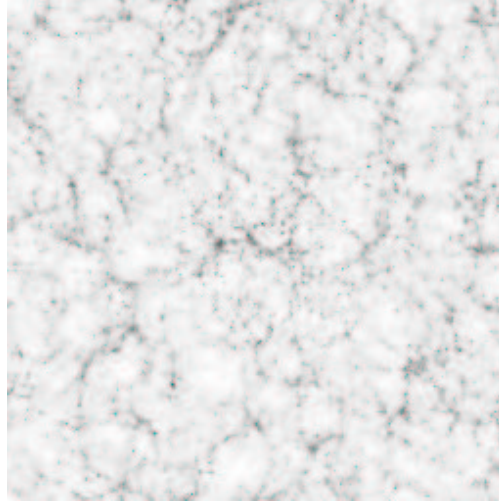
De vorming van structuur

De vraag is nu hoe alle planeten, sterren, sterrenstelsels en clusters van sterrenstelsels hebben kunnen ontstaan in een vrijwel perfect homogeen heelal. Het meest plausibele antwoord dat we hebben is via structuurvorming middels *gravitationele instabiliteit*.

Kleine dichtheids- en snelheidsverstoringen werden steeds groter onder invloed van hun onderlinge gravitationele aantrekkingskracht. Onder invloed van de netto resulterende gravitatiekracht werd materie aangetrokken door gebieden met een hoger dan gemiddelde dichtheid, waardoor zich op die plaatsen in de loop van de tijd steeds meer materie opeen heeft gehoopt. Deze hierdoor hoger geworden dichtheid betekent een sterkere zwaartekracht, waardoor het effect sterker wordt, hetgeen uiteindelijk leidt tot een vicieuze cirkel: gravitationele instabiliteit. Andersom zullen gebieden met een lager dan gemiddelde dichtheid een kleinere gravitationele aantrekkingskracht op hun omgeving uitoefenen. Daardoor zal materie uit deze gebieden wegstromen naar gebieden met een hogere dichtheid, hetgeen een steeds leger wordend gebied met een steeds lagere dichtheid achterlaat.

Tijdens de eerste fase van dit proces, wanneer de dichtheidsverstoringen nog relatief klein zijn, is de resulterende materieverdeling voornamelijk een versterkte versie van de oorspronkelijke verdeling. Deze fase noemen we het *lineaire regime*. Op het moment dat de dichtheidsverstoringen substantieel hiervan af beginnen te wijken, ontkoppelt de expansie van materieconcentraties van de globale kosmische expansie en beginnen deze samen te trekken. De daaropvolgende ineenstorting verloopt volgens een reeks van karakteristieke anisotrope patronen. In het begin nemen ze een vlakke wandachtige structuur aan, gevolgd door een samentrekking tot een uitgerekte filamentaire vorm, voordat uiteindelijk de volledige ineenstorting en virialisatie tot een klomp van materie plaats heeft. De fysische eigenschappen van de primordiale dichtheidsfluctuaties zijn verantwoordelijk voor een tweede belangrijke aspect van gravitationele structuurvorming, namelijk de *hiërarchische* aard ervan. Omdat de fluctuaties op kleine schalen sterker zijn dan die op grote schalen, zullen de vroegst gevormde objecten klein zijn. Grotere objecten vormen doordat kleine, eerder gevormde objecten, samen klonteren. Dit proces van *hiërarchische structuurvorming* lijkt inderdaad overeen te komen met hetgeen we waarnemen: *sterrenstelsels* zijn veel ouder dan de massievere en recentelijk ineengestorte *clusters* van sterrenstelsels. Op een nog grotere schaal hebben *Superclusters* nog niet eens de ineenstortingsfase bereikt of ze zijn net begonnen met samentrekken.

De manier waarop deze hiërarchisch ingebedde structuren zichzelf hebben geordend in het heelal bevat een rijkdom aan informatie over het structuurvormingsproces. Ze lijken gegroepeerd te zijn in vlakke of filamentaire, gedeeltelijk samengetrokken superclusters. Deze zijn onderling verbonden middels een uitgestrekt webachtig systeem, gescheiden door enorm grote en lege gebieden. Dit kos-



Figuur 2 — Voorstelling van een gedeelte van het heelal dat gecreëerd is door een computersimulatie

mische web strekt zich uit over het gehele waarneembare heelal.

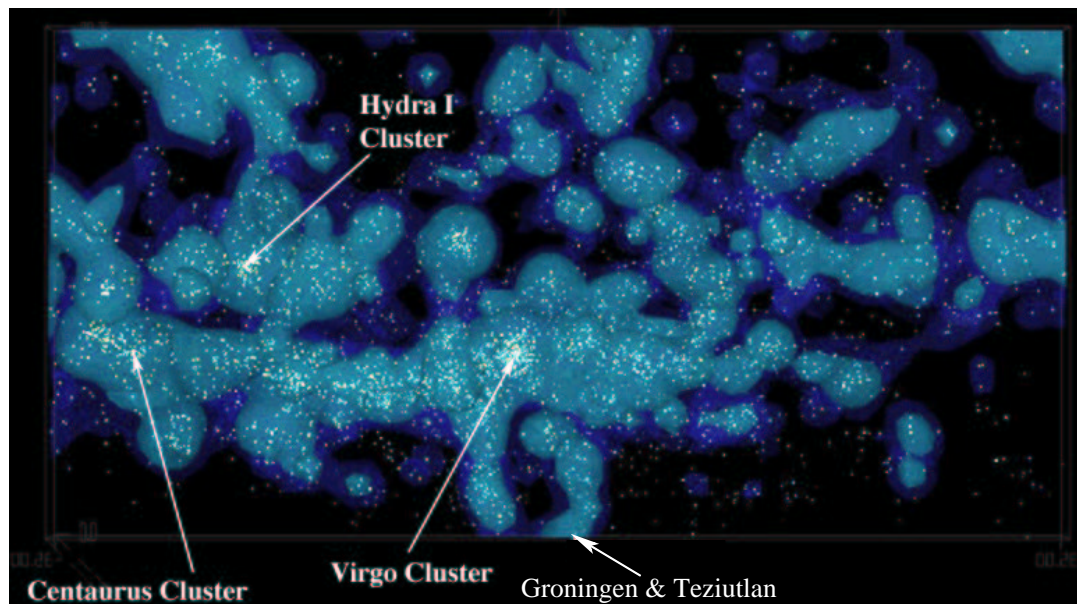
Om de theorie van gravitationele instabiliteit te testen, hebben we daarvoor relevante structuren en fenomenen nodig. Deze zouden bij voorkeur een directe link met de primordiale omstandigheden in het heelal moeten hebben, zodat we de resulterende informatie relatief eenvoudig kunnen interpreteren. Er is een verscheidenheid aan zulke *kosmische fossielen*. Een belangrijk voorbeeld zijn de temperatuurschommelingen in de kosmische microgolfachtergrondstraling, een directe reflectie van de kleine embryonische kosmische verstoringen van waaruit structuur is gegroeid. Een ander belangrijk voorbeeld is gerelateerd aan de kaart van de verdeling van materie op Megaparsec schalen, het hedendaagse produkt van het structuurvormingsproces. Op basis van de veronderstelling dat de sterrenstelselverdeling een goede weerspiegeling is van de onderliggende materieverdeling, vormen kaarten van de ruimtelijke sterrenstelselverdeling wellicht het meest geanalyseerde *kosmische fossiel*. De hiermee samenhangende kosmische stromen representeren een ander belangrijk fossiel. De studie van de eigenschappen van sterrenstelsels vormt daarom een cruciale aanvulling op bovengenoemde analyses.

Computersimulaties van het heelal

Theoretische kosmologische modellen doen voorspellingen over het structuurvormingsproces in het heelal. De kosmische structuren die door astronomen worden waargenomen, zijn de eindprodukten van een lang en gecompliceerd evolutionair proces. Om de verschillende structuurvormingsscenarië's te testen, nemen kosmologen hun toevlucht tot computersimulaties die de evolutie van het heelal modelleren.

Het gebruik van computersimulaties heeft zich ontwikkeld tot een belangrijk hulpmiddel voor studies van de grote schaal structuur. Computersimulaties volgen de evolutie en vorming van kosmische structuren overeenkomstig de theorie van gravitationele instabiliteit. *N-deeltjes* simulatieprogramma's vormen het belangrijkste gereedschap om de verschillende aspecten van deze evolutie te volgen. In dit berekende heelal worden deeltjes of vloeistofelementen - die hetzij donkere hetzij lichtgevende materie representeren - op locaties neergezet waar ze zich in het zeer vroege heelal hebben moeten bevinden. Door de zwaartekracht in rekening te brengen, wordt het systeem van deeltjes geëvolueerd in de tijd. Ook meer gecompliceerde fysische processen zijn in ogenschouw genomen, waardoor het mogelijk is om te bepalen hoe en wanneer sterrenstelsels gevormd worden en waar het meeste gas in het heelal zich bevindt.

Figuur 2 laat het resultaat van een *N*-deeltjes simulatie zien. De grijswaarden geven de dichtheid (het aantal deeltjes) aan. Op deze manier correspondeert zwart met gebieden met een grote concen-



Figuur 3 — Symbolische voorstelling van de Lokale Supercluster. Elk puntje representeert een sterrenstelsel. De grijze gebieden bevatten meer dan een gemiddelde hoeveelheid sterrenstelsels. De meest in het oog springende clusters van sterrenstelsels worden aangegeven met labels, evenals de lokatie van de Melkweg. (Met dank aan Brent Tully, zie www.ifa.hawaii.edu/tully/outreach)

tratie van materie (clusters van sterrenstelsels), grijs met superclusters, lichtgrijs met filamenten en wit met lege gebieden. De filamentaire structuur (het kosmische web) is duidelijk te zien. De goede overeenstemming tussen de resultaten van N -deeltjes simulaties en het waargenomen heelal is een geruststellend succes van de theorie voor de evolutie van het heelal.

De grote schaal structuur van het heelal

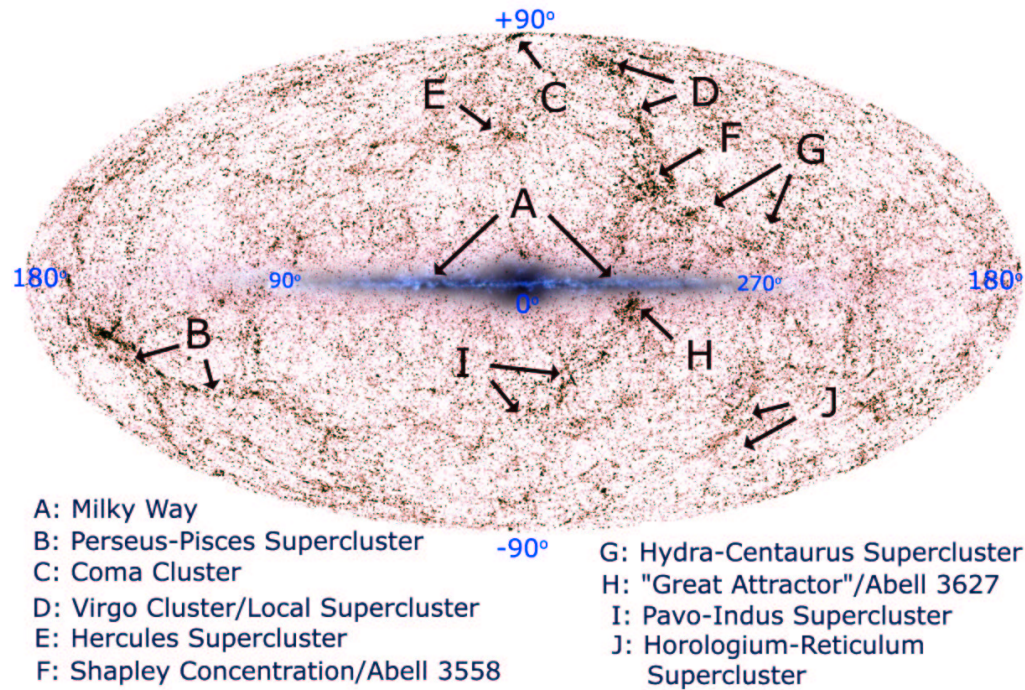
Als we om ons heen kijken, dan zien we dat sterrenstelsels de fundamentele bouwstenen van het heelal vormen. Deze grote en waarlijk magnifieke verzamelingen van honderden miljarden sterren bevinden zich overal in het waarneembare heelal. Een algemene aanname is dat hun verdeling de onderliggende verdeling van materie weerspiegelt. Daarom vormen ze een uitstekend hulpmiddel om de structuur en infrastructuur van het heelal in kaart te brengen.

Sterrenstelsels vertonen een ruime verscheidenheid aan soorten en maten. Vele hebben een schijfachtige vorm. Binnen de schijf kunnen we vaak heldere spiraalarmen herkennen, oplichtend door jonge en blauwe sterren. In de kern van zulke sterrenstelsels vinden we een “bulge”, een geel-rode ellipsoïde concentratie van oudere sterren. Een kleiner gedeelte van sterrenstelsels heeft een bolvormige of elliptische vorm, de “elliptische” stelsels. Deze bevatten een voornamelijk oudere sterpopulatie, met veel minder gas dan de “spiraal”stelsels (zie Figuur 1). De meeste stelsels behoren niet tot deze twee hoofdklassen en zijn veel kleiner. Vaak hebben ze een onregelmatige en slecht-definieerbare vorm, hoewel een flink aantal een elliptische vorm heeft.

Onze Melkweg is een spiraalstelsel met ongeveer 200 miljard sterren. Onze zon is een gemiddelde gele dwergster in de schijf van de Melkweg, ronddraaiend op een straal van $\approx 8,5$ kpc van het centrum van de Melkweg⁶.

Sterrenstelsels zijn verre van gelijkmatig verdeeld over het heelal. Op schalen van tientallen Megaparsecs vertonen ze een intrigerend schuimachtig patroon, het *kosmische schuim*, dat zich uitstrekt

⁶Een “kpc” is een kiloparsec. $1 \text{ kpc} \approx 30\,860\,000\,000\,000\,000 \text{ km}$



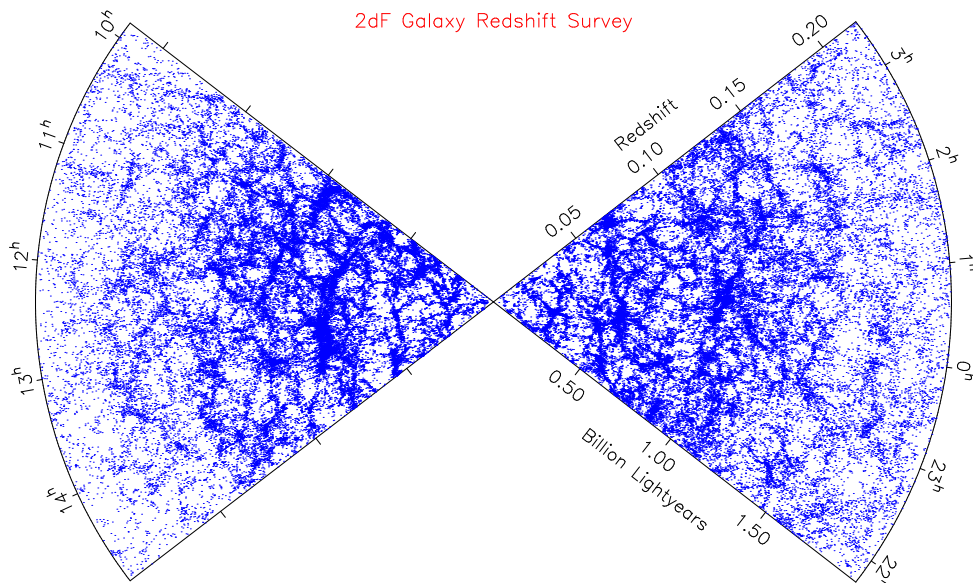
Figuur 4 — Kaart van de verdeling van sterrenstelsels, oriëntatie en lokatie van de grote schaal structuur in het lokale heelal, geprojecteerd aan de hemel. Clusters en superclusters van sterrenstelsels, filamenten en enkele lege gebieden zijn duidelijk zichtbaar. (Met dank aan: 2MASS Extended Source Catalog, T. Jarret en 2MASS/UMass/IPAC-Caltech/NASA/NSF)

over het gehele waarneembare heelal. Op de nog grotere schaal van $\approx 200 h^{-1}\text{Mpc}$ kunnen we geen structuren meer herkennen: op deze schalen bereikt het heelal de homogeniteit die vereist wordt door het kosmologische principe. Op kleinere schalen treffen we echter een ingewikkelde hiërarchie van structuren aan.

Individuele sterrenstelsels worden vaak in *groepen* en *clusters* aangetroffen, die op hun beurt meestal deel uitmaken van nog grotere structuren, *superclusters*. Groepen van sterrenstelsels bestaan uit minder dan 50 leden, voornamelijk spiraalstelsels. Alleen in hele dichte en compacte groepen kunnen ook elliptische stelsels worden aangetroffen. Clusters van sterrenstelsels zijn groter en bestaan uit honderden tot duizenden leden. Ze vormen de meest massieve en meest recent volledig ineengestorte objecten in het heelal. In het centrum van clusters bevinden zich voornamelijk elliptische stelsels, terwijl spiraalstelsels en onregelmatige stelsels zich voornamelijk in de buitengebieden ophouden. De omvang van superclusters is in de orde van $20 h^{-1}\text{Mpc}$ of groter. Ze hebben een dichtheid van een paar tot tien maal de gemiddelde kosmische dichtheid. Dynamisch gezien is de expansie van een deel van de superclusters net gestopt. Het zal echter nog even duren voordat deze structuren volledig ineensstorten.

Een goede illustratie van deze hiërarchische inbedding van structuren op allerlei schalen vormt onze eigen Melkweg. Deze behoort tot een kleine groep van sterrenstelsels, *de Lokale Groep*. Van de ongeveer 40 leden zijn de twee meest massieve stelsels, Andromeda en de Melkweg, verreweg het grootst. De Lokale Groep bevindt zich aan de buitenrand van een groter systeem van sterrenstelsels dat bekend staat als de *Lokale Supercluster*. Deze bestaat uit verschillende groepen van sterrenstelsels, enkele kleinere clusters en één hele rijke cluster in zijn kern, de *Virgo Cluster*. Figuur 3 geeft een beeld van de Lokale Supercluster, waarbij elk witte puntje een sterrenstelsel representeert. Wij bevinden ons aan de onderkant van de figuur. De belangrijkste clusters zijn aangegeven met labels.

De kosmische materieverdeling zou bepaald kunnen worden door kaarten van de verdeling van sterrenstelsels te bestuderen. Als het mogelijk zou zijn om een panoramisch beeld van de verdeling van



Figuur 5 — Kaart van de verdeling van sterrenstelsels in de ruimte als functie van hun afstand tot ons volgens de 2dFGR Survey. Merk op hoe de materie concentraties vormt in bepaalde gebieden (clusters en superclusters van sterrenstelsels), terwijl er ook lege gebieden zijn. (Met dank aan het 2dF Galaxy Redshift Survey team).

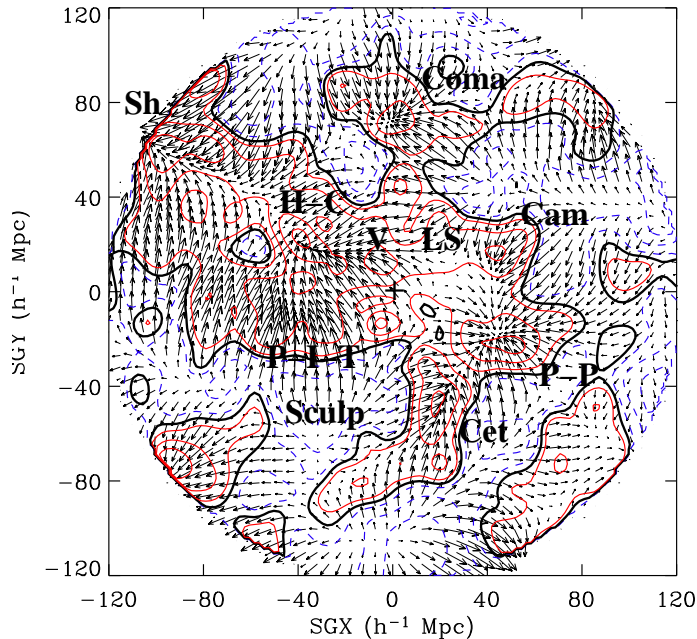
sterrenstelsels voorbij de Melkweg te bekijken, dan zou het resultaat op Figuur 4 lijken. Deze afbeelding is opgebouwd uit de meer dan 1,6 miljard sterrenstelsels (aangegeven met puntjes) die vermeld staan in de All-Sky Survey Extended Source Catalog van de Two Micron All Sky Survey (2MASS). Belangrijke nabijegelegen concentraties van materie zijn voorzien van een label. De vele overdichte gebieden zijn duidelijk zichtbaar. Deze bestaan uit clusters van en superclusters van sterrenstelsels, die de grote schaal van het nabije heelal voor een belangrijk deel bepalen. Merk op dat ons heelal lokaal helemaal niet isotroop lijkt. Het is belangrijk om te beseffen dat de schijnbaar grootte van onze Melkweg in deze projectie een artefact is, resulterend door de nabijheid van de Melkweg. Vanwege onze positie in de schijf van de Melkweg wordt ons uitzicht in het zichtbare licht geblokkeerd door het stof dat zich ook in de schijf bevindt. Met de 2MASS kaart die op microngolflengte is gemaakt, hebben we ineens een veel duidelijker beeld van onze omgeving gekregen. Voorheen onttrokken aan onze aanblik vormt de aanwezigheid van de Great Attractor (H in Figuur 4) een duidelijk voorbeeld hiervan.

Voor een volledig ruimtelijk beeld van de verdeling van sterrenstelsels is het van belang hun afstanden te kennen. Deze zijn lastig om op een directe wijze te meten. Hierbij komt echter de Hubble uitdijning van het heelal ons te hulp. Volgens de Hubble uitdijning is de snelheid van ons af direct evenredig aan de afstand. Door de snelheid te meten, kunnen we dus de afstand bepalen. De snelheid is veel eenvoudiger te meten dan de afstand, vanwege de *roodverschuiving* van het door het stelsel uitgezonden licht. Deze valt te vergelijken met de lagere toon van de sirene van een ambulance die van ons af beweegt. Evenzo wordt het licht van een stelsel roder als het stelsels van ons af beweegt.

Figuur 5 laat de verdeling van sterrenstelsels zien in de Two degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) in een strook aan de hemel. Op deze kaart ligt de Melkweg in het midden van de twee kegels en worden individuele sterrenstelsels aangegeven met een punt. De positie van elk stelsel op de kaart wordt bepaald door zijn roodverschuiving en positie aan de hemel⁷. Het resultaat is een ruimtelijke kaart van de verdeling van sterrenstelsels en materie in ons lokale heelal. Sterrenstelsels, clusters en superclusters vormen samen een webachtig patroon. Hierin markeren superclusters de filamentaire bruggen en vlakke wanden in dit netwerk, terwijl clusters zich op de dichte knooppunten

⁷Merk op dat het lijkt dat er minder stelsels zijn naarmate je verder van de Melkweg komt. Dit is echter een schijneffect, omdat het veel moeilijker is om verder weggelegen en daarom minder heldere stelsels waar te nemen dan dichtbijstaande.

Figuur 6 — Model van de eigensnelheden zoals afgeleid uit de verdeling van materie. De pijltjes geven de richting en grootte van het snelheidsveld aan. De ononderbroken lijnen laten de materieverdeling zien, waarbij compacte gebieden die omsloten worden door een lijn massieve structuren aanduiden, terwijl gestreepte lijnen wijzen op lege gebieden. De labels markeren de posities van de grootste structuren in het veld: V: Virgo cluster, LS: Lokale Supercluster, H-C: Hydra-Centaurus, Sh: Shapley, P-P: Perseus-Pisces, P-I-T: Pavo-Indus-Telescopium, Cet: Cetus wand, Sculp: Sculptor leegte. (Uit E. Romano-Díaz et al. 2004, met data van E. Branchini)



van het netwerk bevinden. Samen omvatten deze uitgestrekte bolvormige gebieden waar zich vrijwel geen sterrenstelsels bevinden, de *leegten*. Tegenwoordig weten we dat dit *Kosmische Web* een van de belangrijkste karakteristieken van ons heelal is.

Kosmische stromen

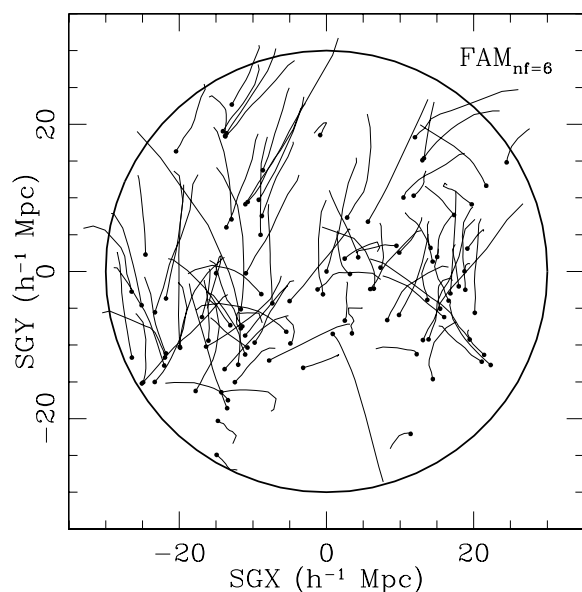
Hoewel op grote schalen het heelal ongeveer met eenzelfde snelheid uitdijt (de Hubble stroom), is dit niet waar voor afzonderlijke sterrenstelsels. Snelheidsmetingen van afzonderlijke stelsels laten zien dat deze afwijken van de Hubble stroom. Deze afwijkingen worden de *eigensnelheden* van deze sterrenstelsels genoemd.

Migratiestromen van kosmische materie zijn een belangrijke manifestatie van de groei van kosmische structuren. Verondersteld dat kosmische structuren afkomstig zijn van kleine dichtheidsfluctuaties die versterkt werden door de zwaartekracht, zijn eigensnelheden en materieverstoringen nauw aan elkaar gerelateerd. De kosmische stromen verplaatsen materie richting gebieden waar zich steeds meer materie opeenhoopt, alwaar zich geleidelijk de structuren vormen die we tegenwoordig waarnemen in het heelal.

Aangezien eigensnelheden het resultaat zijn van de gecombineerde zwaartekracht van alle materieconcentraties in het heelal samen, weerspiegelen ze niet alleen de lokale materieverdeling maar ook verder weggelegen structuren. Aangezien zowel lichtgevende als donkere materie de zwaartekracht uitoefenen, bevatten kosmische stromen bovendien informatie over de totale materieverdeling. In principe zou daarom het snelheidsveld gebruikt kunnen worden om het corresponderende dichtheidsveld te bepalen of vice versa.

Er is veel energie gestoken in het nauwkeurig meten van eigensnelheden en het corrigeren voor mogelijke willekeurige of systematische fouten. Hiervoor is het noodzakelijk om de echte afstanden tot sterrenstelsels te meten in plaats van hun roodverschuivingen. Studies van eigensnelheden zijn daarom beperkt tot een kleiner gebied dan studies van roodverschuivingen.

Het snelheidsveld is veel gevoeliger voor fluctuaties in de kosmische materieverdeling op grote dan op kleine schalen. Hierdoor is het voor reconstructies van het eigensnelheidsveld van groot belang om een voldoende groot volume in aanmerking te nemen. Dit volume moet zo groot zijn dat het alle



Figuur 7 — Reconstructie van de banen van sterrenstelsels op basis van het Least Action Principle. De punten representeren de huidige posities van de sterrenstelsels, terwijl de stroomlijnen hun banen terug in de tijd volgen.

relevante materieconcentraties bevat die het eigensnelheidsveld zouden kunnen beïnvloeden.

Een van de meest massieve en nabije materieconcentraties, de *Great Attractor*, werd ontdekt door onderzoek aan eigensnelheden. Niet zichtbaar op optische afbeeldingen van de hemel waren het de eigensnelheden die ons wezen op het gebied dat verstopt ligt achter het vlak van onze Melkweg. Dit gebied is grotendeels verantwoordelijk voor onze kosmische beweging. Inmiddels weten we dat het bestaat uit een massieve dichtbijstaande cluster, A3627, die zicht uitstrekt tot de Hydra-Centaurus supercluster.

De Point Source Catalog Redshift (PSCz) is een goed voorbeeld van de relatie tussen de materieverdeling en het snelheidsveld. In Figuur 6 bevindt onze Lokale Groep van sterrenstelsels zich in het midden. De ononderbroken lijnen geven gebieden met een hoge dichtheid aan, de gestreepte lijnen gebieden met een lager dan gemiddelde dichtheid. Met behulp van labels hebben we de belangrijkste structuren aangegeven. De pijltjes geven de richting en grootte van het snelheidsveld aan. Let op de sterke invalsnelheden in de richting van de meest massieve concentraties. Ook de lege gebieden beïnvloeden de kosmische snelheden, zoals we bijvoorbeeld kunnen zien in het gebied rond de Sculptor leegte waaruit materie richting gebieden met een hogere dichtheid stroomt. De kaart laat bovendien zien dat onze Lokale Groep in de richting van de Great Attractor beweegt, die onderdeel uitmaakt van de H-C supercluster.

Dit proefschrift

Ik heb de omgevings- en dynamische effecten bestudeerd die de grote schaal structuur van het heelal heeft op enkele van de belangrijke grote kosmische structuren zoals clusters van sterrenstelsels en filamenten. In het bijzonder heb ik het eigensnelheidsveld van sterrenstelsels en de materieverdeling in de Lokale Supercluster bestudeerd. Hiertoe heb ik het Least Action Principle toegepast en de nieuwe DTFE methode uitgebreid om een volledig ruimtebedekkend snelheidsveld te verkrijgen.

Hoewel het merendeel van de data die in dit proefschrift wordt gebruikt geproduceerd is door computerprogramma's, besluiten we met toepassingen van de betreffende technieken op data van het echte heelal.

Voorbij het lineaire regime: het Least Action Principle

Tijdens het structuurvormingsproces worden de dichtheden in materieconcentraties op een gegeven moment hoger dan de gemiddelde waarden die beschreven worden door de lineaire theorie. Ook voor deze gevorderde, niet-lineaire fases is het mogelijk om de corresponderende kosmische stromen te beschrijven. Eén van de schema's waarmee ook in deze fases de materieverdeling gevolgd kan worden is het *Least Action Principle*. Met deze methode kunnen de banen van sterrenstelsels terug in de tijd gevolgd worden, gegeven hun huidige posities en onder de aanname dat hun beginsnelheden gelijk aan nul zijn (een voorwaarde waaraan wordt voldaan omdat het vroege heelal bij benadering homogeen en bewegingsloos was). Met deze methode is het mogelijk om op elk tijdstip de snelheid van ieder object te schatten. Figuur 7 illustreert de reconstructie van de banen van een groep sterrenstelsels (puntjes). De stroomlijnen geven de bewegingen van deze sterrenstelsels aan terwijl het heelal evolueerde. Merk op hoe in dichte gebieden de banen sterker worden afgebogen dan die van meer geïsoleerde sterrenstelsels, hetgeen laat zien waarom het moeilijker is om eigensnelheidsvelden te bestuderen in gebieden met een hoge dichtheid.

Van een stel “test”-catalogi verkregen uit N -deeltjes simulaties hebben we de eigensnelheidsvelden gemodelleerd. Hiervoor hebben we een efficiënte implementatie van het Least Action Principle, de Fast Action Minimization [FAM] methode, gebruikt. Het belangrijkste voordeel van FAM is dat het mogelijk is om de beweging van deeltjes in gebieden met een hoge dichtheid te volgen, zelfs voor een groot aantal deeltjes⁸. Om de betrouwbaarheid van deze gemodelleerde snelheidsvelden te bepalen, hebben we ze vergeleken met de “echte” snelheidsvelden van de N -deeltjes experimenten.

De belangrijkste resultaten van dit deel van mijn onderzoek zijn:

- In het eerste deel van dit proefschrift hebben we het eigensnelheidsveld (van N -deeltjes simulaties) bestudeerd in gebieden die op onze Lokale Supercluster lijken. We hebben de invloed van de massaverdeling buiten onze Lokale Supercluster op de lokale dynamica bestudeerd. De resultaten geven aan dat in alle plausibele kosmologische scenario's de massaverdeling buiten onze Lokale Supercluster de lokale dynamica significant beïnvloedt. We hebben laten zien dat het mogelijk is om rekening te houden met deze effecten, en dat deze door een paar dynamische termen beschreven kunnen worden. De nauwkeurigheid van onze resultaten hangt af van het kosmologische model en de precieze configuratie van het systeem.
- Om meer concrete conclusies te kunnen trekken over de invloed van de externe materieverdeling op de dynamica van de Lokale Supercluster hebben we de *Constrained Random Field* methode gebruikt. De correct gemodelleerde beginomstandigheden, ontworpen om de massaverdeling in ons lokale heelal zo goed als mogelijk te beschrijven, werden geëvolueerd door middel van een N -deeltjes programma. Onze simulaties zijn erin geslaagd om enkele eigenschappen van de grote schaal structuur van ons heelal te reproduceren. Zo hebben we structuren die lijken op de Great Attractor, Perseus-Pisces en Hydra-Centaurus in onze simulaties aangetroffen. Uit een gedetailleerd onderzoek van deze simulaties blijkt bovendien dat ze het dynamische gedrag van het waargenomen heelal goed beschrijven.
- Door het resulterende eigensnelheidsveld in de “constrained” simulaties te modelleren, hebben we aangetoond dat de massaverdeling die onze kosmische omgeving (de Lokale Supercluster) omgeeft goed beschreven wordt door de gemiddelde snelheid en de zogenaamde “shear”. De gemiddelde snelheid beschrijft hoe de ingesloten materie als geheel beweegt onder invloed van de omliggende externe materieverdeling. De shear beschrijft de verstoring van het snelheidsveld door de structuren die buiten het in ogenschouw genomen gebied liggen.
- We hebben de FAM techniek toegepast om het eigensnelheidsveld van echte data te modelleren, waarbij we de Point Source Catalog redshift survey (PSCz) hebben gebruikt. Hierbij hebben we

⁸Desalniettemin faalt ook deze methode in het reproduceren van de bewegingen van sterrenstelsels in de centrale gebieden van clusters, waar de dichtheid zeer hoog is, hoewel dit probleem geen invloed heeft op onze belangrijkste conclusies

gezocht naar de belangrijkste structuren die verantwoordelijk zijn voor het eigensnelheidsveld van ons Lokale Superclustergebied. De resultaten geven aan dat de clusters die op gemiddelde afstand staan, zoals Hydra-Centaurus en Perseus-Pisces (Fig. 4 en 6), de dynamica van de Lokale Supercluster bepalen. Ook structuren op grotere afstanden, zoals de Shapley Structuren, hebben nog steeds een effect op onze lokale kosmische omgeving.

Continue snelheidsvelden: het DTFE snelheidsalgoritme

In het tweede deel van het proefschrift hebben we voortgebouwd op een nieuwe techniek om vanuit een discreet gesampled snelheidsveld een continu en ruimtebedekkend snelheidsveld te verkrijgen.

De vergelijking van waargenomen en gesimuleerde snelheidsvelden met de voorspellingen van theoretische modellen is alleen mogelijk onder de aanname dat de waargenomen velden een goede beschrijving vormen van het onderliggende snelheidsveld. In werkelijkheid is dit niet het geval. De eigensnelheden zijn alleen bekend op de lokaties waar zich waargenomen sterrenstelsels of simulatiedeeltjes bevinden. Theoretische voorspellingen zijn gebaseerd op de veronderstelling dat het snelheidsveld continu en goed gedefinieerd is binnen het volume dat beschouwd wordt. De resulterende vergelijking met theoretische voorspellingen is daarom niet altijd goed gedefinieerd. De velden die met elkaar worden vergeleken zijn daarom niet altijd gelijk!

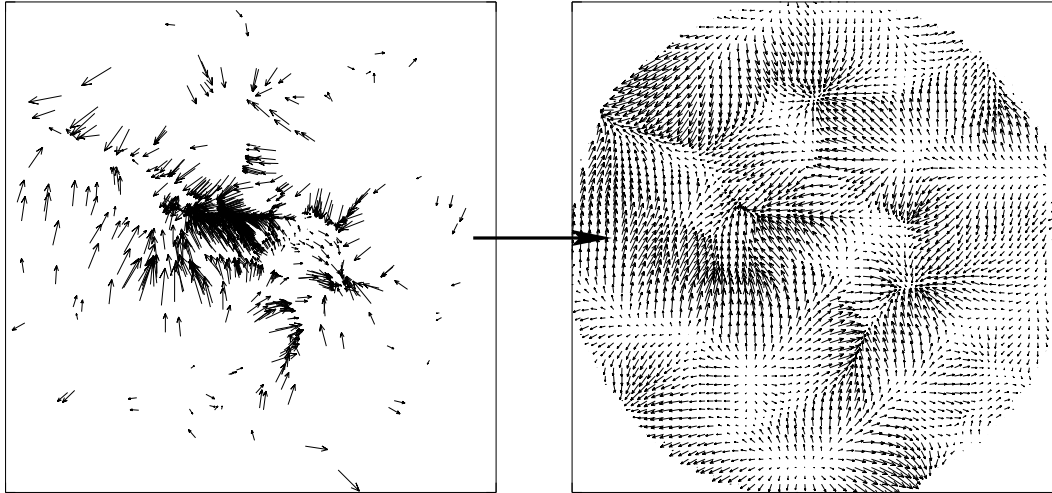
Bij het vergelijken van theorie en waarnemingen wordt het gemeten snelheidsveld geïnterpoleerd naar alle andere posities in het gesampled volume, waaronder gebieden met weinig of geen data. Conventionele interpolatiemethoden maken gebruik van kernels die de snelheden van de deeltjes in de kernel middelen. De prijs van deze benadering is dat signalen met een kleinere afmeting dan de grootte van de kernel worden uitgewist. Hiermee gaat informatie in gebieden met een hoge dichtheid verloren. In veel gevallen is de interpolatiemethode bovendien niet in staat om gebieden met weinig data te beschrijven. Daarom is naast de interpolatie ook een *smoothing* operatie noodzakelijk. Deze zorgt er onder andere voor dat er snelheidswaarden worden toegewezen aan gebieden met weinig data. De prijs van deze smoothing operatie is dat er opnieuw informatie verloren gaat, ditmaal op schalen kleiner dan de afmetingen van de smoothing kernel.

Idealiter zou alle informatie op zowel grote als kleine schaal behouden blijven, zodat een consistente bestudering van het eigensnelheidsveld mogelijk is. De analyse van de eigensnelheidsvelddispersie op kleine schaal bevat bijvoorbeeld informatie over de totale hoeveelheid materie en volledige dynamische toestand binnen een gegeven gebied. Als deze uit de deeltjesverdeling zelf zou worden bepaald, dan zouden wellicht misleidende conclusies kunnen worden getrokken. Deze studie geeft immers veel gewicht aan hoge dichtheidsgebieden die relatief goed gesampled zijn. Een veel betere benadering is om een gelijkwaardige significantie toe te kennen aan de slecht gesampled lage dichtheidsgebieden door een continu en ruimtebedekkend snelheidsveld te gebruiken.

Wij hebben een geavanceerd interpolatieschema ontwikkeld dat zich automatisch aanpast aan de geometrie van de deeltjesverdeling, en dat zowel op kleine als op grote schaal snelheidsvelden oplost. Van deze Delaunay Tessellation Field Estimator [DTFE] (zie Schaap 2005) techniek is het bekend dat de hiermee gereconstrueerde snelheidsvelden goed bepaalde statistische eigenschappen hebben (Bernardeau & van de Weygaert 1996). De DTFE is gebaseerd op een driehoekig netwerk, bekend onder de naam Delaunay tessellatie, die naburige punten verbindt op een volledige adaptieve en objectief gedefinieerde manier.

Voortbouwend op de introductie van de DTFE laat Figuur 8 een discreet snelheidsveld zien dat gesampled is op de deeltjesposities. Het is gemodelleerd met behulp van de materieverdeling zoals gemeten in de PSCz catalogus van ons nabije heelal. De snelheidspijlen die in het rechterframe worden aangegeven zijn het resulterende DTFE snelheidsveld. Alle structuren die aanwezig zijn in de discrete kaart zijn ook aanwezig in de DTFE kaart, maar ook de gebieden zonder eigensnelheidsdata worden volledig beschreven.

De belangrijkste resultaten van de analyse van DTFE snelheidsvelden kunnen als volgt opgesomd worden:



Figuur 8 — Eigensnelheden zoals afgeleid uit de werkelijke snelheidsverdeling van de verdeling van sterrenstelsels volgens de PSCz catalog van ons nabije heelal. Het linkerpanel toont het discrete snelheidsveld, het rechterpanel het continue ruimtebedekkende snelheidsveld dat door het DTFE snelheidsalgoritme is gereconstrueerd.

- De DTFE snelheidsmethode kan zowel op kleine als op grote schaal de karakteristieke elementen van het eigensnelheidsveld reconstrueren. De DTFE snelheidsvelden hebben de vereiste eigenschappen, namelijk dat ze continu en volumebedekkend zijn over het gehele gesampelde volume. Met onze implementatie kunnen gerelateerde grootheden als de uitdijng of samen-trekking van het snelheidsveld eenvoudig berekend worden, evenals de rotatie, uitrekking en compressie. Vergelijkingen van DTFE snelheidsvelden met theoretische voorspellingen komen zeer goed met elkaar overeen. De resultaten laten zien dat deze techniek een belangrijke stap voorwaarts is bij het analyseren van kosmische eigensnelheden op zowel kleine als grote schalen. Hetzelfde geldt voor studies van de dynamica van het kosmische web.
- Met de DTFE techniek hebben we bestudeerd hoe “koud” de Lokale Supercluster is, i.e., hoe groot of klein de snelheidsafwijkingen van een pure Hubble stroom zijn. De grootte van deze afwijkingen hangt af van het kosmologische model. Waarnemingen geven aan dat ons lokale heelal koud is. Onze methode heeft ons in staat gesteld om objectievere conclusies te trekken, omdat we de stroom over het gehele gesampelde volume kunnen schatten en bestuderen. De resultaten geven aan dat onze kosmische omgeving inderdaad vrij koud is. De snelheidsafwijkingen zijn erg klein, en onze algemene beweging wordt bepaald door een sterke coherente stroom die uitgeoefend wordt door een zeer massieve structuur, de Great Attractor.

Detectie van het kosmische web: filamenten

In een project met J. Dietrich en P. Schneider hebben we de zwakke lenseigenschappen van het kosmische web bestudeerd met als doel het detecteren van filamenten die twee dicht bij elkaar gelegen clusters met elkaar verbinden. De massaverdeling in de buitendelen van clusters van sterrenstelsels is veel moeilijker te onderzoeken dan in de binnendelen van clusters. We hebben de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid van een methode getest waarmee het in principe mogelijk is om de zwakke lenssignalen van filamenten te meten. We hebben dit gedaan door filamentaire configuraties te onderzoeken waarvan de beginomstandigheden door de Constrained Field techniek bepaald zijn. Deze simulaties zijn zo ontworpen dat ze zo dicht mogelijk in de buurt komen van de werkelijke configuratie van twee dichtbij elkaar liggende clusters met een filament die ze verbindt. De resultaten laten zien dat

er inderdaad een klein maar detecteerbaar signaal van filamenten is. Dit signaal is ook gedetecteerd voor de dubbele cluster A222 en A223.

Conclusies en vooruitblik

Het centrale thema van dit proefschrift is het begrijpen van de oorsprong en de belangrijkste eigenschappen van het lokale eigensnelheidsveld van sterrenstelsels. Hiertoe behoren de grote schaal structuren die de dynamica van de Lokale Supercluster beïnvloeden. Het onderzoek van grote schaal structuur boekt nog steeds snelle vooruitgang door het beschikbaar komen van nieuwe data en dit zal voorlopig zo blijven met de ambitieuze surveys die in de komende jaren uitgevoerd zullen worden. Met betere data en nieuwe theoretische en computergereedschappen kunnen kosmologen vooruit kijken naar het beantwoorden van enkele van de raadsels die ons huidig kosmologisch wereldbeeld omringen. Tot de meest belangrijke hiervan behoren vragen die direct gerelateerd zijn aan de oorsprong en het lot van ons heelal: wat is de aard van de donkere materie en de donkere energie?